



Matériaux pour les échanges thermiques dans les réacteurs à sel fondu du cycle Th/U

M. Allibert, D. Heuer, C. Le Brun

► To cite this version:

M. Allibert, D. Heuer, C. Le Brun. Matériaux pour les échanges thermiques dans les réacteurs à sel fondu du cycle Th/U. 2005, pp.1-12. in2p3-00025201

HAL Id: in2p3-00025201

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00025201>

Submitted on 9 Dec 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

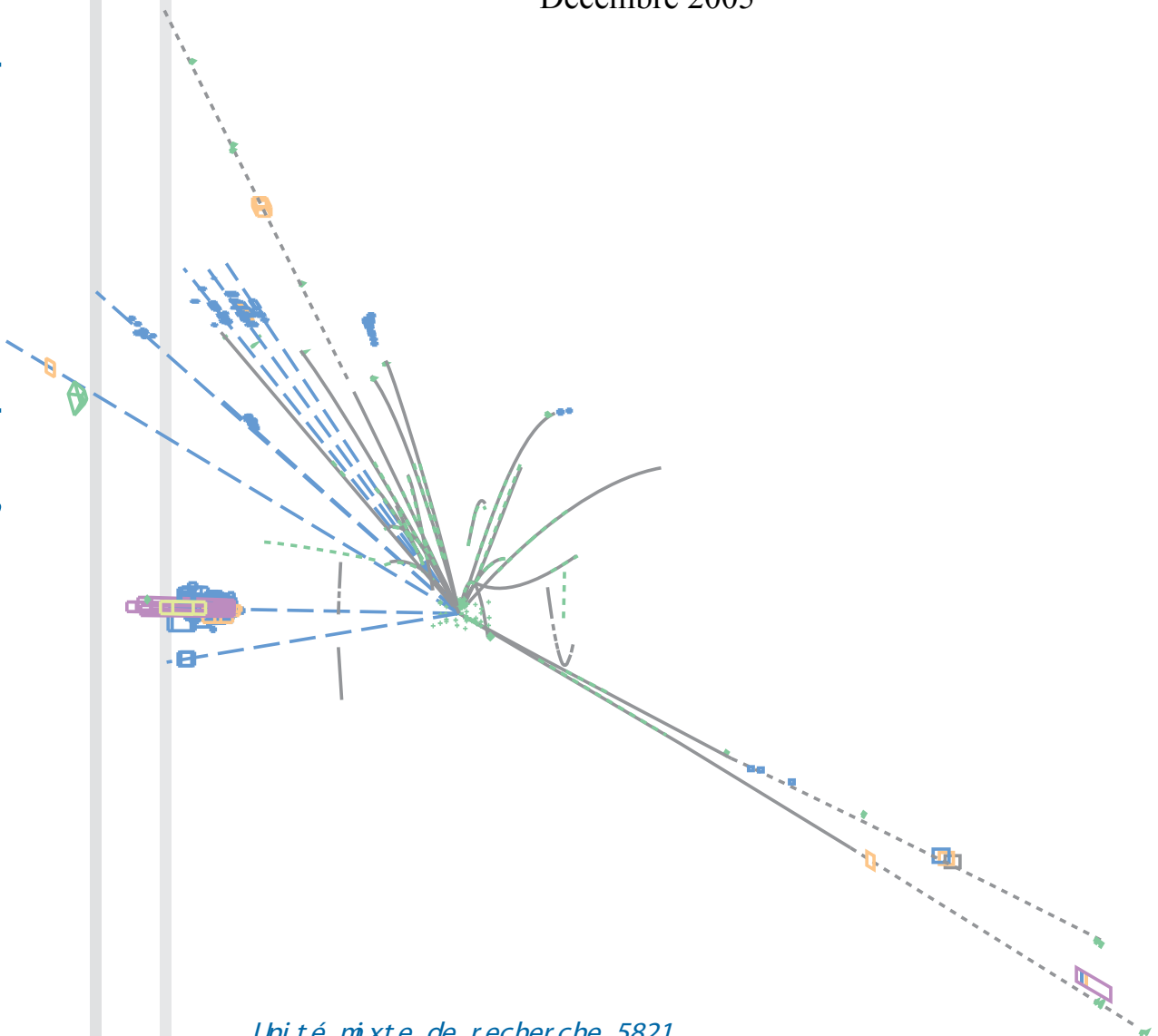
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Matériaux pour les échanges thermiques dans les Réacteurs à Sel Fondu du Cycle Th/U.

Michel ALLIBERT, Daniel HEUER, Christian LE BRUN

Décembre 2005



Unité mixte de recherche 5821

CNRS-INS2P3 / UJF / INPG

Matériaux pour les échanges thermiques dans les Réacteurs à Sel Fondu du Cycle Th/U.

Michel ALLIBERT, Daniel HEUER, Christian LE BRUN – décembre 2005.
Note LPSC 05-126

Production d'énergie dans un réacteur nucléaire à sel fondu.

Un réacteur nucléaire est un système de production d'énergie par fission de noyaux qui doit, au minimum, d'une part réaliser des conditions neutroniques favorables à la fission de l'élément qui a été sélectionné et, d'autre part, permettre l'extraction de la chaleur ainsi produite. (*Voir la fiche Les options de l'électronucléaire du futur*). Outre ces fonctions minimales, il doit présenter une sûreté de fonctionnement la meilleure possible, pour que son existence soit admise par le public, et avoir une durée de vie longue pour des raisons économiques. Pour éviter les problèmes de ressources en Uranium 235, seul élément fissile présent dans la nature, il va falloir utiliser, en cas de développement du nucléaire, les éléments fertiles existants, l'Uranium 238 et le Thorium 232. Ceci conduit à mettre au point des réacteurs qui soient au moins régénérateurs, c'est-à-dire produisant au moins autant de matière fertile qu'ils en consomment, et à produire la charge initiale d'éléments fissiles pour démarrer les réacteurs. De plus, aujourd'hui, un facteur important d'acceptation des réacteurs nucléaires est la minimisation de la production des déchets à vie longue, c'est ce qui a orienté l'action actuelle vers le cycle ^{232}Th (matière fertile) / ^{233}U (matière fissile) qui produit intrinsèquement une quantité de déchets à vie longue inférieure d'au moins un ordre de grandeur aux meilleurs réacteurs du cycle ^{238}U (fertile) / ^{239}Pu (fissile) pour lequel les réacteurs doivent être à neutrons rapides.

Dans les réacteurs à eau pressurisée actuels (REP), comme dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR) du cycle U/Pu ayant déjà fonctionné, le combustible est solide et séparé du caloporteur (eau pressurisée ou sodium) par un gainage. Dans les réacteurs à sel fondu, aussi bien pour le cycle U/Pu que Th/U, les deux sont confondus en un même milieu liquide, les combustibles étant sous forme de fluorures, éventuellement de chlorures. Il existe deux avantages principaux à ce dispositif. Le premier est que la chaleur est produite dans le milieu même qui sert à son extraction, ceci économise la fabrication du combustible solide et son confinement et permet de très fortes densités de puissance. Le second est que la composition du combustible peut être contrôlée à chaque instant. C'est une économie sur le retraitement mais avant tout un atout capital pour la sûreté de fonctionnement. C'est, en effet, le seul type de réacteur qui ne possède aucune réserve de réactivité, réserve qui est une source potentielle d'accidents graves et qui doit donc être prise en compte dans l'analyse de la sûreté des autres types de réacteurs. Enfin les sels fondus sont d'excellents caloporteurs, insensibles aux radiations et susceptibles de fonctionner aux plus hautes températures.

Ainsi en combinant les avantages du Th et ceux des réacteurs à sel fondu on peut espérer proposer la meilleure solution possible pour la production électronucléaire. Pour que cette solution soit validée il faut étudier les options scientifiques disponibles ainsi que les possibilités technologiques. C'est l'objet de programmes en cours au niveau français et international.

Sur le schéma ci-dessous les diverses parties d'un réacteur à sel fondu sont détaillées, sans que la version proposée ici puisse être considérée comme définitive ou même optimale.

Sur cet exemple on voit une cuve de confinement en acier contenant le coeur du réacteur et les échangeurs de chaleur entre sels primaire et secondaire. Le coeur est constitué d'une cuve en matière réfractaire non neutrophage (par ex: ZrC ou graphite) contenant le sel et une couverture qui produit de l'uranium 233 à partir d'un sel de thorium. Une barrière neutronique (par ex: B₄C) sépare ces éléments d'un ensemble d'échangeurs thermiques dont la disposition est censée limiter le volume de sel primaire hors coeur à la moitié du volume en coeur. Un isolant thermique protège la cuve externe d'un échauffement excessif. Il constitue une barrière, en cas de fuite de sel, par simple figeage.

Le sel circule, par pompage, de haut en bas à travers des échangeurs et remonte, en se réchauffant, dans le coeur. L'écart de température du sel entre le bas et le haut du coeur est de 100 à 250°C. La température minimale du sel avoisine 650° ou 800°C, selon la composition choisie pour le sel primaire.

Un dispositif de sûreté passive par vidange du coeur est schématisé en dessous de la cuve.

Comme dans les réacteurs classiques il existe trois barrières de confinement du combustible : une cuve interne chaude (éventuellement doublée), ouverte, la cuve froide de la chaudière, étanche au gaz, et le bâtiment dépressurisé du réacteur.

Dans le cas d'un RSF au Thorium le sel serait initialement constitué d'un mélange de fluorures à base de ⁷LiF et de ThF₄, avec ajout éventuel de BeF₂. Ce mélange serait complété par une faible teneur en fluorures d'uranium 233.

Cette composition évolue ensuite au cours de la vie du réacteur par suite de la production d'actinides et des produits de fission. Certains de ces produits de fission (PF) sont des poisons neutroniques. Le plus pénalisant d'entre eux, le Xe doit être extrait en continu par balayage d'He. D'autres, comme les Lanthanides (Terres Rares), peuvent rester dans le sel pendant plusieurs années, voire toute la vie du réacteur si on accepte d'augmenter la quantité de matière fissile. Il est cependant vraisemblable qu'un traitement du sel hors coeur serait réalisé pour limiter la concentration des PF, sur une dérivation à très faible débit de sel primaire. En outre une alimentation en Thorium et un ajustement de la teneur en ²³³U, ainsi qu'un contrôle des propriétés du sel, assureront le maintien de la régénération et de la réactivité et garantiront en continu le bon fonctionnement de l'ensemble.

Ces dispositifs ne sont pas représentés sur les schémas ci-dessous.

En résumé :

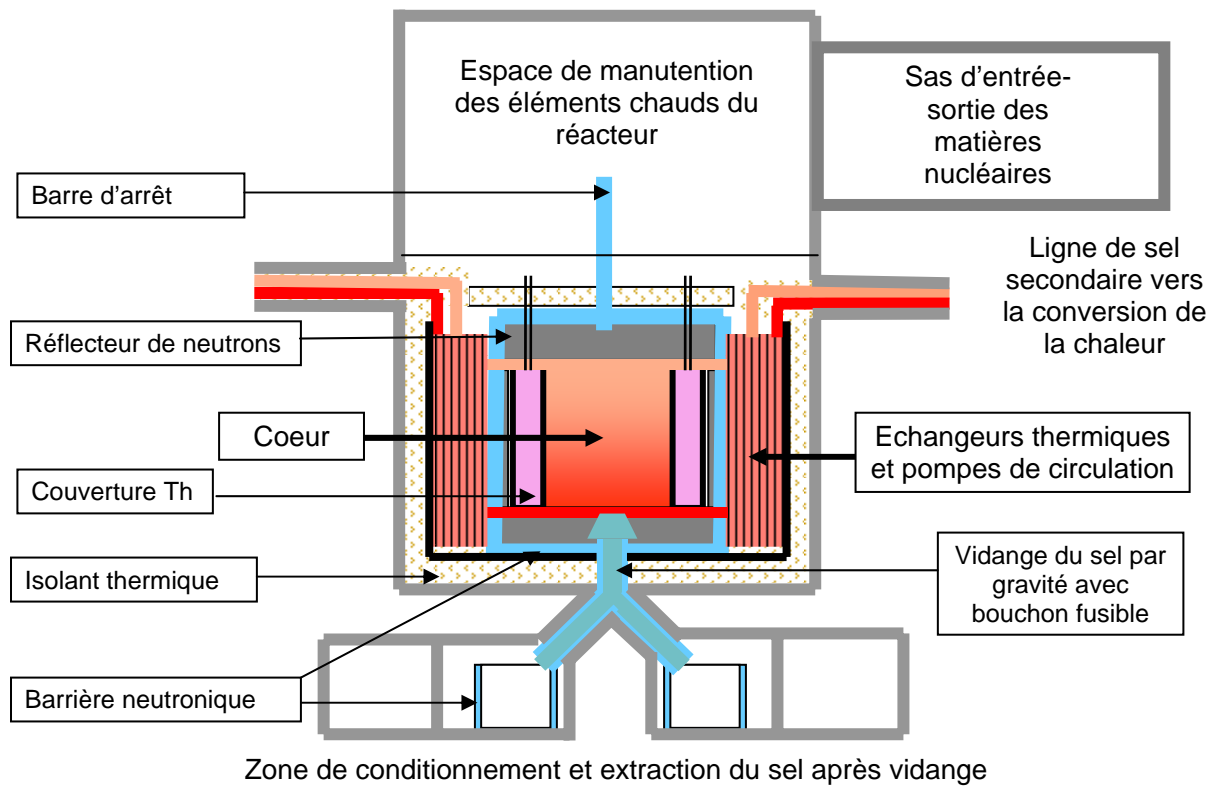
Les avantages potentiels du Thorium-based Molten Salt Reactor (TMSR) sont :

- une sûreté passive exceptionnelle : pas de réserve de réactivité, un coefficient de température fortement négatif (pas d'emballement même de très courte durée), un coefficient de vide négatif, une vidange passive du coeur,
- une production de radioéléments à vie longue, par emploi du Th, au moins d'un ordre de grandeur plus faible que les meilleurs réacteurs U/Pu,
- la possibilité d'un fonctionnement à haute température si les matériaux adéquats existent,
- une bonne souplesse de déploiement

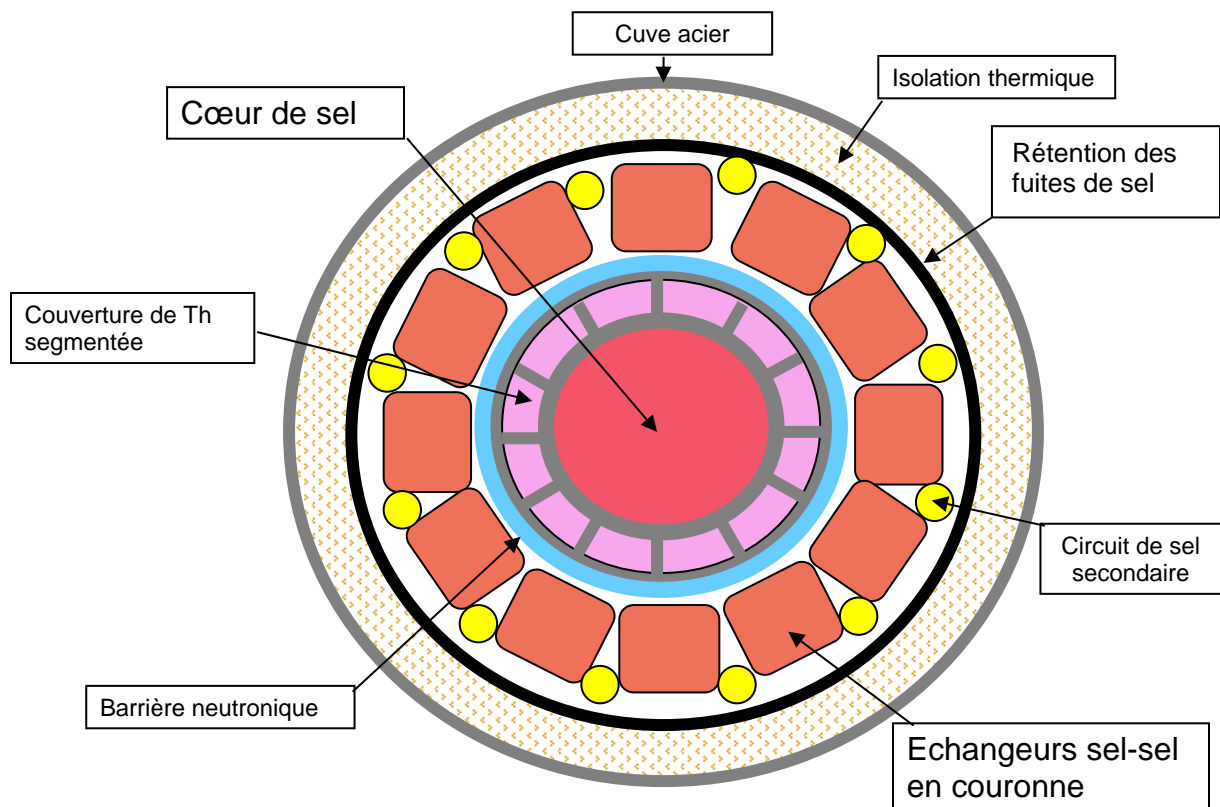
Les validations scientifiques ou techniques restant à faire concernent :

- les matériaux de structure fonctionnant à plus de 750°C (échangeurs et pompes),
- le traitement en continu du sel pour éliminer les PF gazeux et les métaux nobles,
- le traitement différé du sel pour limiter les concentrations en PF solubles,
- les méthodes de contrôle du sel pour garantir le bon fonctionnement de l'ensemble et limiter la corrosion.

Coupe verticale de la chaudière.



Coupe horizontale au niveau du cœur



De plus amples détails sont donnés dans les fiches ci-après sur :

- Les options de l'électronucléaire du futur.
- L'historique des réacteurs à sel fondu.
- Les recherches en cours sur les RSF.
- L'état actuel des réflexions sur un réacteur au Thorium (TMSR).
- Les matériaux de structure en contact avec le sel primaire chaud.
- Les expertises technologiques recherchées.

Les options de l'électronucléaire du futur.

Au niveau mondial un consensus a été obtenu, grâce au Forum « Generation IV », sur les réacteurs qui pourraient, dans le cas où la production d'énergie nucléaire serait développée, constituer des options pour une production électronucléaire aux environs de 2040 et sur les systèmes de production associés. Ces options répondent à des critères variables selon les diverses conceptions des cycles des combustibles nucléaires.

<http://gif.inel.gov/roadmap/>; http://www.energethique.com/energie/generation_IV.htm#bal5

Le choix comporte trois types de réacteurs consommant du Plutonium. Deux versions sont refroidies par He sous pression (60/75 bars): le GFR (Gas-cooled Fast Reactor) à neutrons rapides et le VHTR (Very High Temperature Reactor) à neutrons thermiques. Une autre version à neutrons rapides est refroidie par du sodium liquide : le SFR (Sodium-cooled Fast Reactor). Les deux derniers types de réacteurs sont le SCWR (Super Critical Water Reactor) qui devrait fonctionner à 250 bars et le MSR (Molten Salt Reactor) qui n'est pas pressurisé (comme le SFR) et qui peut travailler avec une bonne sécurité passive, quelque soit le spectre neutronique.

Il est clair que toutes les filières possibles n'ont pas atteint le même état de maturité et qu'il y a toujours une hésitation entre la solution parfaitement validée, mais dont les inconvénients sont bien connus, et la solution nouvelle, d'autant plus attractive que l'on ne dispose pas de réalisations concrètes pour infirmer les espoirs qu'on a en elle.

Les arguments à valider pour un choix futur relèvent d'une part de l'acceptabilité du nucléaire par l'opinion publique et d'autre part de raisons économiques. Au stade actuel il faut privilégier les premiers faute de quoi aucun moyen d'étude et d'expérimentation ne pourra être mis en œuvre, c'est-à-dire qu'aucune documentation scientifique et technique ne pourra éclairer un futur choix. Ces facteurs d'acceptabilité sont :

- la sûreté de marche du réacteur (passive de préférence à active),
- la minimisation des déchets (production de produits de fission, via le rendement de conversion, production d'actinide mineurs, matériaux de démantèlement),
- la non prolifération des armes nucléaires, liée aux combustibles issus des réacteurs ou à leur manutention et stockage,
- la préservation des ressources naturelles.

Les réacteurs à sel fondu au thorium sont bien placés pour répondre à l'ensemble de ces critères mais n'ont pour l'instant fait l'objet que d'une seule validation expérimentale (voir fiche : l'historique des réacteurs à sel fondu).

L'historique des Réacteurs à Sel Fondu (RSF).

Les réacteurs à sel fondu (Molten Salt Reactor en anglais : MSR) sont les seuls réacteurs où le combustible et le caloporteur ne forment qu'un, avec pour avantage la possibilité de contrôler en permanence la composition du combustible. En principe la composition du combustible pourrait être maintenue constante au cours de la vie du réacteur par extraction et réintroduction continue du sel liquide qui subirait des traitements adaptés hors cœur. Une importante conséquence de ce principe est l'absence de réserve de réactivité empêchant un emballement accidentel grave du réacteur. Une seconde conséquence est économique, c'est la simplification de préparation et de manutention du combustible.

Un des intérêts principaux du cycle thorium/uranium²³³ est sa capacité d'être surgénérateur sur tout le spectre en énergie des neutrons, et donc en particulier en spectre thermique. Dans ce cas le besoin en matière fissile pour démarrer les réacteurs est très faible (~1 tonne d'U³) mais le bilan neutronique est très serré. La possibilité offerte par les sels fondus du traitement chimique en ligne pour éliminer aussi vite que possible les produits de fission les plus pénalisants au niveau neutronique a été très vite mise en avant et faisait donc partie du premier projet industriel qu'était le Molten Salt Breeder Reactor (MSBR) défini à Oak Ridge au début des années 70.

Des expérimentations ont été conduites dans plusieurs pays au cours des années 60/70 (USA, France, URSS). Celle dont les résultats sont les mieux connus aujourd'hui est le Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) qui a fonctionné à Oak Ridge National Laboratory (ORNL) de 1965 à 1968 qui a fait l'objet d'un nombre impressionnant de rapports détaillés. Ce réacteur expérimental de faible puissance (8 MW) a montré qu'en plus du fonctionnement en continu du réacteur, des questions comme la corrosion par le sel fluoré ou les produits de fission, l'extraction de la matière fissile (U 235 et 233), l'extraction des produits de fission gazeux ou nobles étaient facilement maîtrisable. Par contre elle n'a rien apporté sur le traitement chimique du sel et tout particulièrement sur l'élimination des poisons neutroniques comme les lanthanides.

Cette expérimentation a été conduite à une température de 650°C environ et donc les problèmes liés aux plus hautes températures n'ont pas été abordés. On considère aujourd'hui que le matériau de structure utilisé alors, l'acier à base Ni « Hastelloy N » (ou d'autres comparables), n'a pas de propriétés mécaniques suffisantes au dessus de 850°C et ceci sans préjuger de sa tenue à la corrosion par les produits de fission (PF).

Depuis quelques années le concept de RSF a été revisité par des chercheurs en utilisant les moyens de calculs et des connaissances non disponibles à l'époque du MSRE. Ils se sont aussi placés dans une logique différente de celle de l'époque. En effet la surgénération de matière fissile était alors le souci principal par peur d'un accroissement intolérable du coût du combustible. Aujourd'hui le coût du combustible et en particulier de la matière fissile n'est pas le problème principal pour l'avenir de l'électronucléaire (on dispose de stocks importants de Pu) et les objectifs assignés à un système de production électronucléaire ont beaucoup changé. Il en est résulté une réduction des incertitudes sur la viabilité des RSF soit comme utilisateur de Pu ou incinérateur, soit comme producteur d'une très faible quantité d'actinides mineurs par emploi du cycle du Thorium, questions qui ne se posaient pas avec acuité en 1970.

Les recherches en cours sur les RSF.

En France ces recherches ont été relancées par EDF et le CNRS il y a quelques années, puis se sont étendues ensuite, avec la participation du CEA, au plan international. Aujourd'hui elles sont soutenues en France par le programme PACE (Programme pour l'Aval du Cycle Electronucléaire) qui regroupe les partenaires français publics et privés ayant des rôles scientifiques ou économiques à jouer au plan national sur l'ensemble du cycle électronucléaire. Ce programme a été conçu au départ pour répondre aux interrogations formulées par la loi « Bataille » sur le devenir des déchets nucléaires et s'intéresse maintenant aussi aux études sur les systèmes innovants du futur. Il gère d'une part des actions d'échanges scientifiques comme les groupements Gedepeon, Nomade, Paris, des programmes communs de recherche (PCR), dont un est spécifiquement dédié aux RSF, et des soutiens aux équipes engagées dans ce domaine.

Au niveau international le monde concerné par les sels fondus dans les réacteurs nucléaires est en interaction suivie via le forum Generation IV, des contrats européens, les actions des agences internationales (AIEA, NEA) et des congrès internationaux (Global, Physor, MS7, etc.).

Les travaux à réaliser pour démontrer la faisabilité scientifique de ces réacteurs ont été définis dans ces réseaux et sont résumés maintenant :

- Procédé de *contrôle en ligne du sel* pour maîtriser le fonctionnement du réacteur et la corrosion.
- Procédés *d'élimination des produits de fission* comportant : la mise au point du bullage en ligne, et la maîtrise des produits extraits, et le retraitement du sel pour enlever les lanthanides.
- Etude de *composants compatibles* avec les sels, les produits de fission, l'irradiation et la haute température.
- Définition des *structures de cœurs* ayant de bons coefficients de sûreté.
- Etude et mise au point des outils de *sécurité passive* (bouchon de sécurité, évacuation de la chaleur résiduelle).
- Développement et validation d'outils pour la *simulation du fonctionnement* (couplage neutronique, thermo- hydraulique et chimie) d'un RSF en condition normale ou accidentelle.

Les chercheurs français assurent une part dominante du travail de recherche de faisabilité scientifique des RSF, pour leur version répondant d'abord aux demandes actuelles de production d'énergie dans le cycle thorium.

Les questions relevant de la faisabilité technique des RSF ont été reportées à une période à laquelle les options principales auront pu être documentées scientifiquement. Néanmoins il est capital de s'assurer par avance qu'aucun verrou technologique ne peut remettre la faisabilité des RSF en question. C'est ce dernier point qui motive un intérêt pour les matériaux de structure des réacteurs.

L'état actuel des réflexions sur un réacteur au Thorium (RSF Th, or TMSR in English)

Fin 2005 les études de neutronique menées au LPSC (<http://lpsc.in2p3.fr/gpr/publi.html>) conduisent à définir un schéma de réacteur avec de bons coefficients de réactivité, certes non figé, mais qui présente des particularités importantes pour définir les matériaux de structure.

Combustible caloporteur :

Les constituants principaux du combustible sont LiF (avec du ^7Li exclusivement), ThF_4 (^{232}Th est l'élément fertile), UF_3/UF_4 (avec l'isotope fissile ^{233}U) et éventuellement BeF_2 pour abaisser le point de fusion du sel et réduire l'inventaire initial en matière fissile. Il reste deux options intéressantes selon qu'on veut opérer le réacteur à « basse » température ($<750^\circ\text{C}$) avec l'emploi presque obligatoire de BeF_2 , ou à « haute » température ($<1000^\circ\text{C}$) sans nécessairement employer BeF_2 .

Caloporteur secondaire :

Il est envisagé de transférer la chaleur à un circuit de sel secondaire à l'intérieur de la cuve de confinement de la chaudière. Les sels concernés seraient probablement constitués de fluorures alcalins (LiF , NaF , KF), avec ou sans constituants abaisseur du point de fusion (ZrF_4 , BF_3). Les échangeurs de chaleur seraient donc des échangeurs sel-sel à ce niveau, même si des échangeurs sel-gaz pourraient être utilisés, sur le circuit secondaire, pour une conversion directe par turbine à gaz.

Modérateur :

Le Thorium a l'avantage d'avoir la possibilité de régénérer l' ^{233}U avec des neutrons thermiques ou rapides. Le graphite avait été envisagé initialement comme matériau de thermalisation des neutrons dans le cœur du réacteur dans le cas des neutrons thermiques. Sa tenue aux radiations lui confère une durée de vie en cœur très courte (quelques années) et donc très pénalisante en arrêt de réacteur et production de déchets. Des calculs récents ont montré qu'il est possible d'opérer sans matériel modérateur pour les neutrons, avec un cœur en sel liquide. Le cœur est alors constitué d'une cuve pleine de sel dont les parois sont constituées soit de réflecteurs de neutrons non modérateurs soit d'assemblages de couverture dans lesquels du Th est irradié pour produire de l' ^{233}U .

Volume de sel :

L'optimisation de la quantité de matière fissile (^{233}U) nécessaire au fonctionnement du réacteur (son inventaire en matière fissile) dépend d'abord de la masse critique nécessaire pour assurer la réaction en chaîne et donc du spectre de neutron choisi mais aussi du volume de sel et de la densité de puissance thermique, qui doit rester importante. La conséquence est qu'il faut minimiser le volume de sel hors cœur, c'est-à-dire celui qui assure la fonction de caloporteur. Pour cela on peut d'une part raccourcir au maximum le parcours du sel et le volume des échangeurs thermiques sel primaire - sel secondaire, d'autre part admettre la plus forte chute de température possible, le tout avec une grande vitesse de circulation.

Température du sel :

En supposant que des matériaux soient disponibles pour les éléments de structure (matériaux carbonés) il est intéressant d'avoir la température la plus forte possible :

- pour réduire la consommation du combustible et les déchets par gain sur le rendement de conversion électrique,
- pour permettre des applications directes à la production d'hydrogène,

- pour profiter de la meilleure efficacité des mélanges salins à faible teneur en éléments lourds qui ont un point de fusion supérieur à 800°C (transfert thermique et inventaire en produit fissile).

Finalement du point de vue des matériaux de structure hors cœur, on a deux options. La plus évidente est celle des matériaux métalliques (Inconel 617, Haynes 230, Hastelloys) qui peuvent fonctionner à 750°C, voire 850°C, mais sont rapidement dégradés au dessus de cette dernière température (cas accidentel). La seconde, moins documentée, est celle des matériaux carbonés ou des métaux réfractaires (Ti, Zr, Mo, Nb). L'avantage des matériaux carbonés tient à leur insensibilité mécanique à la température, celui des métaux réfractaires à leur conductibilité thermique et leur tenue aux gradients thermiques.

Les matériaux de structure en contact avec le sel primaire chaud.

On envisage de regrouper autour du cœur les échangeurs, vannes et pompes pour minimiser le volume du sel. De ce fait ces éléments sont approximativement à la température du cœur et entourés d'une isolation thermique qui permet de confiner l'ensemble dans une cuve en acier à basse température. En cas d'incursion thermique accidentelle, dont l'amplitude sera limitée par le coefficient de réactivité thermique négatif spécifique de ce RSF et par l'inertie thermique de l'ensemble sel + réflecteurs + circuit de sel, il est prévu de vidanger le sel dans une cuve de sécurité. Ceci supprime la nécessité de maintenir un refroidissement à haute température en cas d'accident. Ainsi la tenue en température excessive pourrait être limitée à l'heure et à 100/200° au dessus de la température nominale de fonctionnement.

Même dans ces conditions favorables il n'est pas certain que l'emploi de métaux soit tolérable si la température nominale dépasse 750°C. Néanmoins l'emploi de métaux dans les échangeurs thermiques est très attractif car le volume des échangeurs et leur encombrement sont réduits et la chute thermique tolérable est potentiellement plus forte qu'avec des matériaux carbonés par suite de l'élasticité et de la ductilité intrinsèque des métaux.

Pour des températures nominales proches de 1000°C l'emploi de matériaux carbonés semble indispensable pour leur tenue mécanique, même s'il doivent être associés à des ensembles métalliques pour certaines fonctionnalités.

Entre les deux températures citées, l'emploi d'assemblages de différente nature est à envisager, avec les problèmes de différentiels de dilatation associés, afin d'optimiser l'efficacité de l'ensemble.

Ces matériaux hors cœur sont soumis à des radiations très inférieures à ce qui existe dans le cœur, ce qui minimise les contraintes de tenue aux radiation sans toutefois les supprimer totalement.

De manière schématique on peut distinguer les composants suivants :

Canalisations de distribution :

Elles prélèvent le sel chaud en haut du cœur pour le conduire aux pompes et échangeurs disposé à la périphérie du cœur, au-delà de la couverture et d'une barrière de protection neutronique. Elles redistribuent le sel froid au bas de la cuve de manière à assurer une homogénéisation dans la cuve. Elles connectent entre eux les échangeurs (cascades d'échangeurs éventuellement) et les pompes aux échangeurs.

Ces sections de canalisation sont relativement isothermes.

Des formes complexes peuvent s'avérer utiles.

Leurs dimensions sont inférieures au mètre pour la longueur et à 25 cm pour le diamètre équivalent.

Pompes :

Les pompes de circulation rapide du sel (quelques m/s) sont nécessaires pour vaincre les pertes de charge dans les échangeurs, mais les écarts de pression amont - aval sont <1 bar. Elles peuvent être disposées en zone chaude ou en zone froide et restent isothermes. Les débits volumiques envisagés sont de 0.05/0.1 m³/s pour chaque pompe.

Echangeurs thermiques sel- sel :

Si des échangeurs métalliques sont utilisables aux températures indiquées ci-dessus ils devraient être favorisés grâce à leur encombrement réduit et à leur tenue aux gradients thermiques. Dans le cas contraire, les échangeurs en graphite, composite carbone- carbone ou SiC, devront être optimisés pour en limiter le volume de sel séjournant.

D'après ce qui est actuellement connu, le graphite (le carbone pyrolytique ?) est parfaitement compatible chimiquement avec le sel, il est probable qu'il en est de même du Mo et du Nb. Le SiC peut subir une corrosion chimique et certains recommandent qu'il soit revêtu de carbone. Le Ti et le Zr peuvent subir une corrosion qui perturberait la composition du sel s'ils ne sont pas revêtus (carbures ou nitrures car leurs oxydes sont solubles dans le sel).

La capacité calorifique des sels est d'environ $4 \text{ MJ/m}^3/\text{°C}$. Un réacteur de 1Gw électrique à haute température nécessitera l'extraction d'environ 2 GW thermiques. Le débit thermique dans les échangeurs sera donc d'environ $500 \text{ m}^3 \times \text{°C} / \text{s}$. Des débits volumiques de l'ordre de quelques m^3/s sont nécessaires, associés à des chutes de température de 100 à 250°C, pour limiter le volume de sel hors cœur aux environs de $8/12 \text{ m}^3$. C'est essentiellement cette dernière condition qui est à respecter.

Vannes d'isolement :

Il n'est pas certain que ces éléments soient indispensables. Néanmoins on peut concevoir qu'il serait utile d'isoler, hors circulation de sel, des ensembles pompes + échangeurs défectueux, la charge thermique étant facilement reportée sur les nombreux éléments restant (par exemple 15 à 30 ensembles pour un réacteur de 2.5 GW thermiques). On peut aussi vouloir faire une vidange à chaud du sel du réacteur sans utiliser la procédure d'urgence pour faciliter la réutilisation rapide du sel.

Isolants thermiques :

L'isolation thermique des échangeurs pour éviter les pertes thermiques, l'isolation de la cuve de confinement externe pour éviter son échauffement, l'isolation thermique de structures métalliques supportant des canalisations ou des composants en céramique en contact avec le sel, afin de limiter leur échauffement, sont des applications pour lesquelles des composants carbonés sont attractifs car insolubles dans le sel contrairement aux oxydes. Ils devraient résister au percement par un jet de sel chaud (fuites accidentelles de sel) et avoir une étanchéité au sel sur leur face chaude.

Les expertises technologiques recherchées.

Au stade actuel (décembre 2005) des réflexions sur la faisabilité d'un RSF au Thorium, alors que les études amont de faisabilité scientifique ne sont pas terminées, il est important de recueillir des avis d'experts sur la faisabilité des ensembles d'extraction de chaleur. Il y a plusieurs raisons à cela, en plus de la détection précoce de verrous technologiques condamnant le concept RSF lui-même.

La principale est que la solution viendra d'une optimisation des contraintes qui touchent à la neutronique, la chimie, la mécanique et la thermique. Les échanges entre les spécialistes scientifiques et techniques des diverses disciplines sont nécessaires, et ont été fructueux jusqu'à présent. Ils ont montré que les solutions optimales dans une discipline deviennent des contraintes intenable dans les autres et que seuls des aller retour fréquents d'information permettent de discerner des voies nouvelles à explorer. En France, ceci a été réalisé essentiellement au plan scientifique jusqu'à présent et a conduit à des évolutions de concept de réacteur (absence de modérateur solide, limitation du traitement chimique du sel). C'est ainsi qu'est apparu la contrainte sur le volume de sel hors cœur qui implique des températures plus élevées qu'antérieurement et des performances poussées des échangeurs thermiques. Il convient donc maintenant d'examiner les solutions possibles à ces questions.

La seconde raison est que, même si l'échéance est encore lointaine pour la réalisation d'un RSF expérimental, il sera nécessaire de procéder par étapes pour valider progressivement les solutions choisies. Cette validation, lorsqu'elle touche à la manipulation de matières radioactives, sera lente car lourde à mettre en œuvre. Il faut donc commencer les validations techniques qui ne nécessitent pas l'emploi de matières radioactives le plus tôt possible. C'est pour cela qu'il existe un projet d'installation expérimentale sur une boucle à circulation de sel fondu en cours d'élaboration. Si ce projet est concrétisé dans les prochaines années il permettra de valider des choix aussi bien de matériaux que d'équipements de manipulation ou d'appareils de mesures, sur des fluorures liquides circulants.

Il apparaît ainsi l'importance de connaître les dispositifs actuellement utilisables après de légères adaptations ainsi que ceux dont la réalisation est possible moyennant un développement plus conséquent.

C'est sur cette question que des avis d'experts sont recherchés actuellement, avec la possibilité d'entamer des collaborations de nature diverse, à définir en fonction des intérêts de chaque partie.